



Vigilada Mineducación

Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del Sistema Acuífero del Altiplano Nariñense
aplicando el método GOD

Intrinsic vulnerability to contamination of the Altiplano Nariñense Aquifer System applying
the GOD method

Laura Sofía Enríquez Hidalgo - Laura Lucía Patarroyo Barragán

Trabajo de grado como requisito para optar al título de *geóloga*

Asesora

Marcela Jaramillo Uribe, PhD.

Universidad EAFIT

Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería

Pregrado en Geología

Medellín, Colombia

2023

Dedicatoria

A Pedro, Clara, Mariaclara y Sara

-Laura Sofía-

Para Martha, Gustavo, Camilo, David y Jose

-Laura Lucia-

Agradecimientos

Gracias a mis papás y hermanas por su constante y total apoyo siempre acompañado de amor, ustedes son la roca que sostiene mi camino, son mi guía y mi bienestar. Gracias a Luci por su lealtad y paciencia. Gracias a mis amigos por cada momento compartido, sus consejos y complicidad. Gracias a la bonita ciudad, a la universidad y a las prácticas que me permitieron aprender en muchos sentidos. Gracias a todas las personas que de manera directa e indirecta me acompañaron, escucharon y aportaron en este tiempo de aprendizaje. Gracias a la música y al arte por complementar muchos de mis momentos.

-Laura Sofía-

Me gustaría agradecer principalmente a mi madre, Martha, por todo su apoyo, paciencia y amor. Me has dado la fortaleza para seguir adelante durante toda mi carrera y en general como persona, eres mi razón y fuerza para seguir adelante. También a mi compañera, Lau, por toda su paciencia y por las risas en modo Nariño. A mis hermanos, quienes me han protegido, amado y apoyado; son mi modelo a seguir. A mi pareja, Jose, por su amor, comprensión y apoyo ilimitado que, sin importar la distancia siempre estuviste a mi lado. A Heri, quien me ha dado su apoyo, compañía y valiosas enseñanzas. A mis tíos, María y Alfredo, por brindarme todo su apoyo y cariño incondicional en cada momento. Por último, a mi padre, Gustavo, que a pesar de que ya no esté, su recuerdo sigue guiándome e impulsándome.

-Lucía-

En conjunto queremos agradecer al Geólogo Vicente Franco por su disponibilidad, ayuda y generosidad. A nuestra asesora Marcela Jaramillo por su orientación y consejos para llevar a cabo este proyecto. A nuestro compañero Mauricio Revelo, quien nos acompañó y colaboró en valiosos momentos.

Tabla de contenido

Resumen.....	1
Abstract.....	1
1. Introducción	2
2. Generalidades	4
2.1 Pregunta de investigación.....	4
2.2 Hipótesis	4
2.3 Objetivo general.....	4
2.4 Objetivos específicos.....	4
3. Zona de estudio	4
3.1 Localización y descripción general.....	4
3.2 Geología	5
3.3 Geomorfología	6
3.3.1 Unidades de origen volcánico	6
3.3.2 Unidades de origen denudacional.....	7
3.3.3 Unidades de origen fluvial y lacustre	7
3.4 Hidrogeología	8
3.4.1. Unidad hidrogeológica consolidada	8
3.4.2. Unidad hidrogeológica de depósitos no consolidados	8
3.5 Hidrología.....	10
4. Marco conceptual	10
5. Metodología	11
5.1 Recopilación de información secundaria.....	11
5.2 Método GOD	11
5.3 Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación	13
6. Resultados	13
6.1 Mapas de parámetros G, O, D.....	13
6.2 Mapa vulnerabilidad intrínseca a la contaminación.....	14
7. Discusión.....	16
Conclusiones	23
Referencias.....	24
Anexos	29

Índice de figuras

- Figura 1.** Mapa de localización de la zona de estudio. **(a)** SAAN empleado para el presente proyecto y geología de la zona. **(b)** Subzona hidrográfica del Río Guáitara y delimitación del SAAN según IDEAM (2019). **(c)** Mapa geomorfológico del SAAN modificado de Pinilla et al. (2007). Elaboración propia a partir de bases de datos del DAMCRA (Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos) (2016) y del IDEAM (2019). DATUM: MAGNA Colombia Oeste.5
- Figura 2.** Esquema de funcionamiento del sistema hidrogeológico del AN. Modificado de Bermoudes (2009).9
- Figura 3.** Guía para asignar valores numéricos a cada uno de los parámetros del método GOD según características específicas de una zona. Tomado de Foster et al. (2002). 12
- Figura 4.** **(a)** Mapa de tipos de acuíferos en el SAAN, parámetro G. **(b)** Mapa de litologías en el SAAN, parámetro O. **(c)** Mapa de rangos de profundidades del agua subterránea en el SAAN, parámetro D. Elaboración propia con base en características hidrogeológicas y geológicas definidas por Pinilla et al. (2007) y niveles estáticos del inventario de puntos de agua obtenidos de la base de datos proporcionada por el SGC. DATUM: MAGNA Colombia Oeste. 14
- Figura 5.** Mapa vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del SAAN. Elaborado a partir de la multiplicación de los mapas parámetros G, O y D. DATUM: MAGNA Colombia Oeste... 15
- Figura 6.** **(a)** Mapa usos del suelo en el AN junto a **(b)** mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del SAAN. Elaboración propia con base en el mapa de coberturas de la tierra de Castellanos et al. (2021). DATUM: MAGNA Colombia Oeste. 19
- Figura 7.** Direcciones de flujo del agua subterránea y drenajes principales en el AN. Elaboración propia con base en las direcciones de flujo propuestas por Bermoudes (2009). DATUM: MAGNA Colombia Oeste. 22

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de suelos para el AN. Elaboración propia con datos obtenidos de Castellanos et al., (2021).....	18
Tabla 2. Porcentajes de áreas de uso agrícola con respecto a las zonas de potencial de vulnerabilidad estimadas con el método GOD. Elaboración propia.	20

Resumen

La capacidad de un acuífero a contaminarse depende de sus propiedades intrínsecas, es decir, la probabilidad a que ingresen sustancias al mismo, dadas las propiedades hidráulicas de la litología suprayacente. La principal causa de contaminación se debe a actividades antropogénicas en superficie. El Sistema Acuífero del Altiplano Nariñense (SAAN) está influenciado por rasgos geomorfológicos que favorecen la recarga del sistema, a partir de ello, se planteó que la infiltración de cargas contaminantes se correlaciona con la topografía. Para estimar la vulnerabilidad se recopiló información geológica, hidrogeológica y puntos de agua inventariados en 2005-2006, que permitió aplicar el método GOD que involucra tres parámetros relacionados al tipo de acuífero, litología de la zona no saturada y profundidad del agua subterránea. Se evidenciaron tres de los cinco índices de vulnerabilidad que propone este método, que corresponden a la clasificación “muy baja”, “media” y “alta”, predominando la vulnerabilidad media con un 51.09% del área total. Dado que el principal uso del suelo en el Altiplano Nariñense (AN) es destinado para agricultura y esta actividad requiere de agroquímicos, existe la probabilidad de que estos sean el principal contaminante, además se evidencia que parte del sistema hídrico superficial tiene un alto índice de alteración potencial de la calidad del agua y su interacción con el sistema acuífero también contribuiría a la dispersión de contaminantes. Se complementó el resultado comparando el mapa de vulnerabilidad con el mapa de coberturas de la tierra en el AN, el cual indica que el 88.44% se destina a territorios agrícolas.

Palabras clave: Sistema Acuífero Altiplano Nariñense, método GOD, vulnerabilidad, agua subterránea, gestión del recurso hídrico, territorios agrícolas.

Abstract

The capacity of an aquifer to be contaminated depends on its intrinsic properties, that is the possibility of substances entering on it, due to hydraulic properties of the overlying lithology. The main cause of contamination is given by anthropogenic activities on the surface. The Altiplano Nariñense Aquifer System (SAAN) is influenced by geomorphological features that allow the recharge of the system, from this, it was proposed that the infiltration of polluting loads is correlated with the topography. To estimate vulnerability, geological, hydrogeological information and water points sampled in 2005-2006 were collected, which allowed us to apply the GOD method that involves three parameters related to the type of aquifer, lithology of the

unsaturated zone and depth of groundwater. Three of the five vulnerability indices proposed by this method were evident, associated to the classification “very low”, “medium” and “high”, where medium vulnerability predominates with 51.09% of the total area. Because the main use of land in the Altiplano Nariñense (AN) is for agriculture and this activity requires agrochemicals, there is a probability that these are the main contaminants, and it is also evident that a part of the surface water system has a high index of potential alteration of water quality and its interaction with the aquifer system would also contribute to the dispersion of contaminants. The result was compared with the vulnerability map with the land cover map in the AN, which indicates that 88.44% is destined to agricultural territories.

Key words: Altiplano Nariñense Aquifer System, GOD method, vulnerability, groundwater, water resource management, agricultural territories.

1. Introducción

El término vulnerabilidad indica el grado en que es probable que un acuífero se vea afectado negativamente en un punto determinado por una carga contaminante o cualquier perturbación impuesta desde la superficie terrestre (Foster et al., 2013; Blanchard et al., 2016). La industrialización, la urbanización, el uso de la tierra y los sistemas de drenaje no planificados aumentan el riesgo de contaminación de los acuíferos (Howard & Gerber, 2018). En este sentido, la gestión integral de las aguas subterráneas y la estimación de la vulnerabilidad son necesarias para su protección y preservación.

Los métodos existentes para determinar y representar mediante mapas la vulnerabilidad, tales como GOD (Foster, 1987), DRASTIC (Aller et al., 1987), SINTACS (Civita et al., 1990) y EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1997), dependen principalmente de la información disponible y requieren de variables geológicas como la profundidad de la superficie freática, las características litológicas e hidráulicas de las capas confinantes, el tipo de suelo, la magnitud de la recarga y el tipo de acuífero (Auge, 2004). Específicamente, el método GOD, propuesto por Foster (1987), utiliza tres parámetros: tipo de acuífero, litología de la zona no saturada y profundidad del agua subterránea, a los que se les asigna un valor específico entre 0 y 1 con base en las características propias de la zona estudiada; el producto de estos parámetros da como resultado un índice de vulnerabilidad que varía en un rango de desde 0 (muy bajo) a 1 (extremo).

En Colombia, la implementación del método GOD en algunas regiones ha sido útil como herramienta de planificación para proteger los acuíferos que sirven como suministro de agua,

que interactúan con el agua superficial o bien, que están expuestos a actividades agropecuarias e industriales; esto permite complementar, por ejemplo, los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) o los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA) (Gómez et al., 2011; Betancur et al., 2013; Díaz et al., 2013; Ruiz, 2018). Se ha evaluado que entre el 65% y 75% del territorio colombiano presenta sedimentos, rocas sedimentarias y vulcano-sedimentarias con el potencial de almacenar y transmitir el agua subterránea por porosidad primaria (Otálvaro, 2020), de tal forma que existe un gran potencial para investigar las aguas subterráneas. Adicionalmente, en departamentos ubicados hacia el suroccidente del país, siendo uno de ellos Nariño, se evaluó de manera cualitativa a escala 1:500.000 la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación con base en la capacidad de almacenamiento de agua subterránea de las unidades litológicas aflorantes (Pacheco et al., 2010).

Los estudios para la exploración de aguas subterráneas que desarrolló el INGEOMINAS en conjunto con la Universidad Nacional entre el 2005 y 2007 en el Altiplano Nariñense (AN), permitieron orientar la caracterización geológica hacia el comportamiento hidrogeológico en esta zona (Carvajal & Romero, 2007; Franco, 2007; Montes & Restrepo, 2006; Pachón, 2006; Pinilla et al., 2007; Salazar & Zapata, 2007). Así, la correlación de la información litológica, estratigráfica, mineralógica, estructural y geofísica determinó las propiedades y condiciones adecuadas para la conformación de acuíferos en el AN. Además, Bermoude (2009) realizó una evaluación hidrogeológica regional de esta zona mediante un inventario y muestreo de puntos de agua.

En este proyecto estimaremos la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del Sistema Acuífero del Altiplano Nariñense (SAAN) aplicando el método GOD. Bermoude (2009) advirtió que más del 60% de los aljibes en el AN fueron abandonados y utilizados como botaderos de desechos, además presentan un elevado contenido de nitratos (hasta 180 mg/l), cloruros (hasta 4000 mg/l) y fosfatos (hasta 13 mg/l) que influyen en la contaminación del agua subterránea. Por su parte, Bolaños y Manchabajoy (2012) evidenciaron lagunas ubicadas en el AN que poseen vegetación de páramo, las cuales son afectadas por actividades agropecuarias, deforestación y en general, por actividades antropogénicas. Adicionalmente, Castellanos et al. (2021) elaboraron un mapa de coberturas de tierra a nivel nacional del cual se infiere que el AN tiene un 87.54% del total del área destinado para territorios agrícolas. En este sentido, el objetivo de este proyecto es proporcionar una alternativa u orientación para la gestión de las aguas subterráneas al priorizar las zonas más propensas a contaminarse en el SAAN, teniendo

en cuenta que hay sectores donde las actividades antropogénicas puedan facilitar la contaminación de este sistema acuífero.

2. Generalidades

2.1 Pregunta de investigación

¿Qué tan vulnerable es el sistema acuífero del Altiplano Nariñense a la contaminación?

2.2 Hipótesis: el Sistema Acuífero del Altiplano Nariñense presenta una alta vulnerabilidad a la contaminación ya que la morfología plana favorece la infiltración de cargas contaminantes.

2.3 Objetivo general: estimar la vulnerabilidad a la contaminación del Sistema Acuífero del Altiplano Nariñense aplicando el método GOD.

2.4 Objetivos específicos

2.4.1 Analizar la información geológica disponible para definir los tipos de acuíferos, la litología de la zona no saturada y la profundidad del agua subterránea.

2.4.2 Establecer los parámetros definidos por el método GOD para obtener un índice de vulnerabilidad (iV).

2.4.3 Elaborar un mapa de vulnerabilidad a escala 1:300.000 que permita analizar cuáles áreas de la zona de estudio son más susceptibles a contaminarse.

3. Zona de estudio

3.1 Localización y descripción general

El SAAN se encuentra ubicado al sur del departamento de Nariño, Colombia, y pertenece a la región fisiográfica conocida como Altiplano Nariñense o altiplano Túquerres-Ipiales. El área escogida corresponde a 1109.32 km² y las principales cabeceras municipales que comprende son Ipiales, Cuaspud, Contadero, Gualmatán, Aldana, Pupiales, Iles, Guachucal, Ospina, Cumbal, Sapuyes, Imues, Guaitarilla y Túquerres. La zona se delimitó al este por el cauce del Río Guáitara, al sur por el límite fronterizo con Ecuador y el Río Carchi y al oeste por las zonas distales de los volcanes Chiles, Cumbal y Azufral (Figura 1).

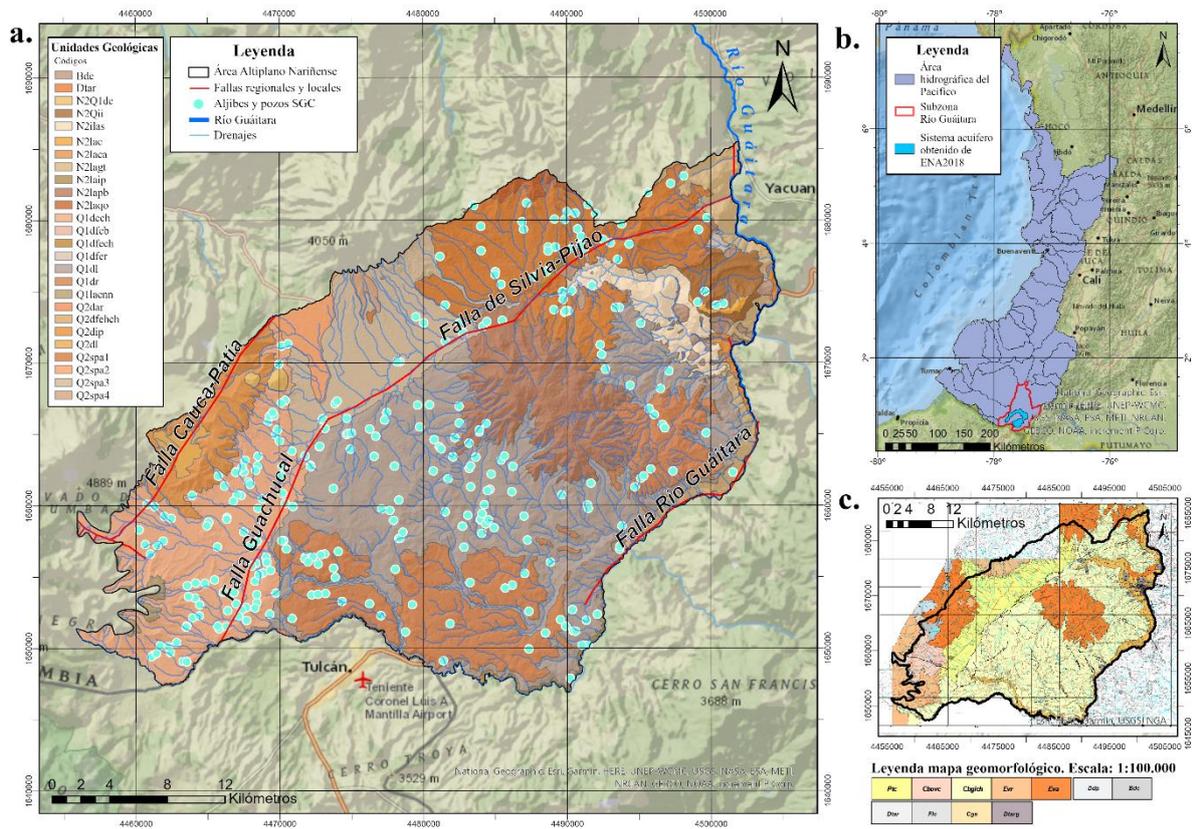


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio. **(a)** SAAN empleado para el presente proyecto y geología de la zona. **(b)** Subzona hidrográfica del Río Guaitara y delimitación del SAAN según IDEAM (2019). **(c)** Mapa geomorfológico del SAAN modificado de Pinilla et al. (2007). Elaboración propia a partir de bases de datos del DAMCRA (Dirección de Asuntos Marinos, Costeros y Recursos Acuáticos) (2016) y del IDEAM (2019). DATUM: MAGNA Colombia Oeste.

El AN se sitúa entre los 2000 y 3000 msnm, lo que da lugar a un clima frío y húmedo, típico de la alta montaña, con dos pisos térmicos: páramo con temperaturas aproximadas de 12°C y el piso térmico frío con temperaturas entre 12 y 18°C (Bermoudes, 2009). La precipitación anual en el área es menor a 1000 mm, ascendiendo con mayores altitudes como en los macizos volcánicos que alcanzan los 4000 msnm. La nubosidad es constante a lo largo del año, por lo que mantiene la humedad relativa del aire por encima del 80% y reduce la evapotranspiración (Bermoudes, 2009).

3.2 Geología

Las rocas más antiguas corresponden a rocas sedimentarias y rocas volcánicas básicas del Cretácico, correspondientes a los grupos Dagua y Diabásico respectivamente, los cuales conforman el basamento, están plegados y deformados constituyendo una cuenca vulcanogénica rellena de material volcánico asociado a distintos episodios eruptivos; sin embargo, no se conoce si el basamento tiene continuidad, pues este no aflora en el área

posiblemente debido a eventos compresionales del Mioceno (González et al., 2002; Pinilla et al., 2007; Velandia et al., 2008). Las rocas aflorantes son principalmente de origen volcánico, que de manera general en el AN son ignimbritas, lavas, depósitos de flujos de escombros, flujos piroclásticos, flujos de corriente, flujos hiperconcentrados, depósitos de caída piroclástica, avalanchas de escombros, oleadas piroclásticas y depósitos no volcánicos (Pinilla et al., 2007). La descripción de las unidades geológicas observadas en la figura 1a se presenta en el anexo 2.

Los rasgos estructurales regionales principales corresponden las fallas Cauca-Patía, relacionada con los volcanes Chiles-Cerro Negro, Cumbal y Azufral, la Falla Silvia-Pijao (sistema de fallas Romeral) y la Falla Guáitara de componente normal dextral que controla en parte el cauce del río con el mismo nombre (Pinilla et al., 2007; Velandia et al., 2008) (Figura 1). Las dos primeras son de tipo inversa y todas con tendencia NE, afectando las orientaciones de las fallas locales. La Falla Guachucal es una estructura activa, localmente considerada la de mayor influencia en el AN, que delimita los depósitos volcánicos antiguos hacia el este y los más recientes al oeste, presenta una tendencia NE, es de rumbo dextral con saltos laterales a la izquierda (Velandia et al., 2008).

3.3 Geomorfología

El AN pertenece al sistema montañoso orogénico andino, forma parte de la Cordillera Occidental y de la parte meridional de la provincia geomorfológica del valle interandino Cauca-Patía. Los rasgos morfológicos están definidos principalmente por procesos volcánicos, denudacionales, fluviales y lacustres, definidos a continuación a partir de la caracterización geomorfológica general (Figura 1c) realizada por Pinilla et al. (2007):

3.3.1 Unidades de origen volcánico

Son geoformas originadas por vulcanismo antiguo y reciente que asocian el levantamiento de edificios volcánicos y materiales geológicos generados en esta actividad. Se dividen en:

- **Subunidad Planicie Túquerres-Cumbal (Ptc):** relieves y colinas planas que alcanzan hasta 500 m de altura, con pendientes suavizadas por la acumulación de depósitos de caída piroclástica, laderas de longitudes menores a 50 m y drenajes subdendríticos. Sus divisorias son suaves, redondeadas y levemente cóncavas con valles en “v” con incisión menor a 5 m.

- **Subunidad Colinas Bajas al oriente del Volcán Cumbal (Cbove):** zona de colinas de hasta 200 m de altura y se encuentran aproximadamente a un mismo nivel de altitud, presentan pendientes moderadas que alcanzan los 20° y topes de morfología planar. Los valles presentan un estado leve de incisión y su área más baja no es muy amplia.
- **Subunidad Colinas Bajas Guaitarilla-Ipiales-Chiles (Cbgich):** colinas con alturas de hasta 200 m, pendientes suaves a moderadas (16-20°), las partes más altas de las colinas son redondeadas, con patrones dendrítico a subdendrítico de baja incisión.
- **Subunidad Edificios Volcánicos Recientes (Evr):** formaciones de origen volcánico reciente que presentan un relieve montañoso, drenajes radiales, valles en “v” con distintos grados de profundidad e inclinaciones que pueden superar los 21°, laderas que van desde 500 hasta 1000 m con formas rectas o irregulares y crestas o topes agudos.
- **Subunidad Edificios Volcánicos Antiguos (Eva):** geoformas con relieve colinado, la longitud de las laderas varía entre 251-1000 m y sus topes son parcialmente redondeados con valles en “v”, presentan patrones de drenaje dendrítico a subdendrítico.

3.3.2 Unidades de origen denudacional

La expresión morfológica de estas geoformas está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte.

- **Subunidad Depósitos de detritos y pendiente (Ddp):** localizados al extremo noreste de la zona, son depósitos de caída de roca acumulados por efecto de movimientos en masa verticales, son caóticos, su morfología es alomada y con longitudes cortas que van de 51 a 250 m.
- **Subunidad Bloques de deslizamiento combinado (Bdc):** depósitos de caída de roca asociados a procesos de remoción en masa, son de aspecto caótico que pueden sobrepasar los 25 m, están localizados en su mayoría en las depresiones topográficas de los ríos Sapuyes y Guáitara (zona este del AN). Sus geoformas son alomadas de apariencia planar, con una longitud que varía entre 501-1000 m y laderas escarpadas.

3.3.3 Unidades de origen fluvial y lacustre

Se originan por el efecto erosivo y acumulativo de las corrientes de los ríos y la sedimentación de materiales en las depresiones topográficas asociadas a los cauces de los ríos Guáitara, Sapuyes y a la Laguna del Cumbal. Estos acumulan fragmentos rocosos subangulares a subredondeados de composición andesítica y en la Laguna del Cumbal se presentan

acumulaciones de arena fina a limo ricas en material orgánico (Pinilla et al., 2007). Las subunidades que cubren el AN corresponden a depósitos de terraza aluvial reciente (Dtar), formas lacustres de Cumbal (Flc) en el oeste, cañón Río Guátara-Río Sapuyes (Cgs) y depósitos de terrazas antiguas del Río Guátara (Dtarg) (Figura 1c).

3.4 Hidrogeología

El agua subterránea del SAAN varía en profundidades desde los 0 m en la planicie que va entre los municipios de Sapuyes y Guachucal, hasta una profundidad que supera los 50 m, donde los acuíferos más profundos están suprayacidos por acuitardos (Bermoudes, 2009). Esta autora menciona dos grupos litoestratigráficos de interés hidrogeológico, el primero consta de lavas del Río Guátara y del Río Sapuyes cubiertas por flujos de escombros o depósitos piroclásticos y por ignimbritas del Neógeno-Pleistoceno (bombas, bloques y matriz de ceniza fina), el segundo corresponde a depósitos volcánicos no consolidados del Cuaternario provenientes de los complejos volcánicos del Azufral, Pajablanca, Chiles-Cerro Negro y Cumbal, así como también de algunos volcanes de la cordillera Real Ecuatoriana. Se diferencian dos unidades hidrogeológicas:

3.4.1. Unidad hidrogeológica consolidada

Conformada por rocas volcánicas con porosidad secundaria, como lavas e ignimbritas, su permeabilidad baja está condicionada por fracturamiento y está afectada por procesos de meteorización que han formado materiales arcillosos que obstaculizan el flujo de agua a través de estas (Pinilla et al., 2007). Las lavas tienen composiciones andesíticas, son masivas, formadas por flujos de lava que pueden sumar más de 250 m y están expuestas en el cañón del Río Guátara que, generalmente presentan diaclasamiento, fracturamiento, meteorización avanzada y brechas de base y techo (Bermoudes, 2009). Las ignimbritas son flujos piroclásticos caóticos, de granulometría que varía de bloques hasta materiales muy finos y presentan un alto grado de compactación, por lo que no se percibe su porosidad intergranular (Pinilla et al., 2007), de todos modos, pueden presentar cierto grado de porosidad secundaria debido a la presencia de estructuras verticales y el fracturamiento de origen tectónico.

3.4.2. Unidad hidrogeológica de depósitos no consolidados

Esta unidad se encuentra suprayaciendo lavas e ignimbritas abarcando distribuciones litoestratigráficas no consolidadas de procedencia volcánica reciente, evidencian una extensión regional, compleja y variable. Los depósitos no consolidados son heterogéneos y permiten que

el sistema sea una alternancia de acuíferos y acuitardos con extensiones y espesores variables, probablemente afectados por barreras hidrogeológicas tales como flujos de lavas e intercalaciones de flujos de escombros con matriz arcillosa (Bermoudes, 2009). La unidad clasificada como “acuitardo” consta de capas gruesas arcillo-limosas de muy baja permeabilidad, entre las cuales puede haber presencia de arenas y gravas con mayores niveles de permeabilidad; dado que estos niveles permeables pueden actuar como acuíferos confinados y semiconfinados, han sido aprovechados como pozos profundos, a pesar de que su rendimiento es limitado (Bermoudes, 2009).

El sistema hidrogeológico del AN se divide en dos subsistemas denominados occidental y oriental (Bermoudes, 2009). En el occidental, el flujo del agua se da hacia los ríos Sapuyes y Las Juntas, es el subsistema que presenta condiciones y características favorables para el aprovechamiento de aguas subterráneas. En el subsistema oriental el agua se direcciona al drenaje regional el Río Guáitara. La figura 2 representa este sistema, en el que los niveles piezométricos son parcialmente altos en la zona de recarga, con flujos verticales, divergentes y ascendentes, sin embargo para las zonas de descarga aumentan los niveles piezométricos y provocan movimientos verticales ascendentes y convergentes (Bermoudes, 2009).

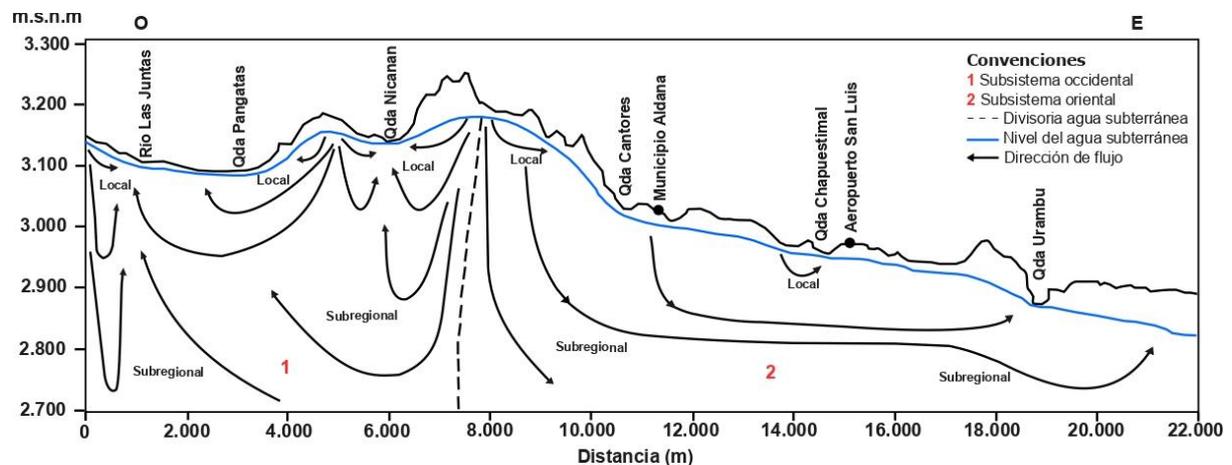


Figura 2. Esquema de funcionamiento del sistema hidrogeológico del AN. Modificado de Bermoudes (2009).

El subsistema occidental es más dinámico superficialmente, con flujos locales que recorren cortas distancias, lo que facilita la renovación relativamente rápida del agua en los acuíferos superficiales y presenta condiciones más favorables de recarga directa por precipitación, mientras que, el subsistema oriental presenta pocos flujos locales, baja capacidad para almacenar agua y una extensa zona de tránsito (Bermoudes, 2009). La recarga por precipitación se condiciona por la permeabilidad de los materiales superficiales, el espesor de la zona no

saturada o zona vadosa, la topografía y las direcciones de flujo, e igualmente, las principales descargas naturales del sistema se direccionan hacia quebradas y ríos (Bermoudes, 2009).

3.5 Hidrología

El SAAN hace parte de la subcuenca hidrográfica del Río Guáitara, la cual corresponde al área hidrográfica del Pacífico y se origina de la cuenca hidrográfica del Río Patía. El Río Guáitara se considera el receptor principal tanto de aguas superficiales como para las aguas subterráneas, naciendo en el complejo volcánico Chiles a una altura de 4600 msnm donde recibe el nombre de Río Carchi (Bermoudes, 2009). En la parte baja de esta subcuenca se encuentran lagunas como puntos de descarga de agua subterránea.

Bolaños y Manchabajoy (2012) presentan un inventario de 61 lagunas naturales, 12 complejos lagunares y 3 lagunas individuales. Específicamente en el AN se evidenciaron 11 lagunas que forman parte de 4 complejos lagunares: Laguna El Carrizo (complejo lagunar Azufral), Lagunas Roja 1 y Roja 2 (complejo lagunar Rojas), 2 lagunas del complejo lagunar Cuaspud y Yapurquer y, por último, las Lagunas de La Bolsa 1, 2, 3, 4, 5 y 7 (complejo lagunar La Bolsa). Cada una posee vegetación de páramo y presentan problemáticas ambientales ya que son usadas como botaderos de basuras, hay deforestación y el suelo se emplea para agricultura o ganadería (Bolaños & Manchabajoy, 2012). Adicionalmente, una parte del complejo lagunar Azufral pertenece al páramo de Pajablanca, el cual abastece de agua a los municipios de Guachucal, Sapuyes, Ospina, Iles, Gualmatán y Pupiales (Alvarado, 2017). Es considerado como un ecosistema de alta fragilidad debido al desarrollo de actividades agropecuarias y urbanización en la zona (CORPONARIÑO, 2017b).

4. Marco conceptual

Una de las primeras definiciones de vulnerabilidad a la contaminación fue propuesta por Albinet y Margat (1970), quienes integraron diversos factores físicos y estables que determinan en qué medida el agua está más o menos expuesta en condiciones naturales, a la contaminación desde la superficie del suelo. La vulnerabilidad se determina con respecto a características naturales de estratos geológicos que suprayacen un acuífero. El ingreso de cargas contaminantes es influenciado dependiendo de factores como su posición en relación con la circulación, la propagación de contaminantes en el flujo de agua local y con el área de captación de la fuente de agua (Foster et al., 2002).

Los mapas de vulnerabilidad intrínseca de un acuífero son el primer paso en la evaluación y protección de la calidad del agua subterránea a nivel local o regional, elaborados a partir de metodologías existentes que dependen de factores como la difusión, el alcance de la metodología, la evaluación de la información disponible y la validación de los resultados (Auge, 2007). Frecuentemente los mapas de vulnerabilidad se combinan con datos sobre uso de la tierra, calidad del agua y fuentes de contaminación que permiten identificar y clasificar áreas en riesgo para planificar proyectos agrícolas, urbanos e industriales, para desarrollar un equilibrio entre el desarrollo económico y la protección del acuífero, al enfocar el monitoreo de calidad de agua junto con un control del uso excesivo de agricultura (Foster et al., 2002; Otálvaro et al., 2011).

El IDEAM (2023) definió 66 sistemas acuíferos distribuidos en doce provincias hidrogeológicas costeras, intramontanas y pericratónicas para Colombia. El AN pertenece a la provincia hidrogeológica montana e intramontana en la clasificación “otros sistemas acuíferos en la región Cordillera Occidental-Central”, como parte del área hidrográfica del Pacífico (IDEAM, 2015); asimismo, forma parte del sistema montañoso andino, que en el límite fronterizo con Ecuador se conoce como Nudo de los Pastos, donde están separadas las cordilleras Occidental y Central por los ríos Guáitara y Patía (IDEAM, 2023).

5. Metodología

5.1 Recopilación de información secundaria

La información base para el desarrollo de este proyecto se recopiló de Pinilla et al. (2007) (Anexos 1 y 2) y del estudio hidrogeológico regional de Bermoudes (2009). Se obtuvieron metadatos de entidades como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y del Servicio Geológico Colombiano (SGC) desde sus datos abiertos al público. De este último se adquirió una base de datos que contiene un registro de puntos de agua subterránea. El procesamiento para la elaboración de los diferentes mapas se realizó en el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS.

5.2 Método GOD

El método GOD, propuesto por Foster (1987), plantea una escala de valores entre 0 y 1 que se asignan a tres parámetros correspondientes a cada una de las siglas: *Groundwater hydraulic confinement*, *Overlying strata*, *Depth to groundwater*. La multiplicación de estos valores en un

ordinario, ya que es el que mejor representa la correlación espacial de los Ne en comparación con otros métodos como *IDW*, *Spline* o *Natural Neighbor*. A partir de estas clasificaciones se elaboraron tres mapas, uno para cada parámetro.

5.3 Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

Se aplicó la ecuación $G \times O \times D$ en la herramienta de álgebra de mapas en ArcGIS con el fin de superponer cada uno de los mapas generados previamente. El producto final se categorizó en tres clases de vulnerabilidad con base en las establecidas en la figura 3.

6. Resultados

6.1 Mapas de parámetros G, O, D

Los mapas de la figura 4 indican la distribución espacial de los valores obtenidos de vulnerabilidad intrínseca para el SAAN, se presentan en formatos digitales de celdas de 12.5 x 12.5 m y a una escala 1:300.000. Las características geológicas tomadas en cuenta para la valoración del parámetro G se presentan en el anexo 1, donde se identificaron cuatro tipos de acuíferos (Figura 4a). La asignación de valores para el parámetro O se realizó de acuerdo con las características litológicas propias de cada unidad geológica, para el cual se obtuvieron cuatro clases (Figura 4b). Tanto los valores asignados como las litologías se evidencian en el anexo 2. Finalmente, el parámetro D se determinó interpolando los niveles estáticos (Ne) de 298 puntos inventariados por el SGC para el cual se identificaron tres rangos de profundidades del agua subterránea (Figura 4c), los valores asignados de 0.9, 0.8 y 0.7 corresponden a rangos de profundidades tales como: menores a 5 m, 5 a 20 m y 20 a 50 m respectivamente.

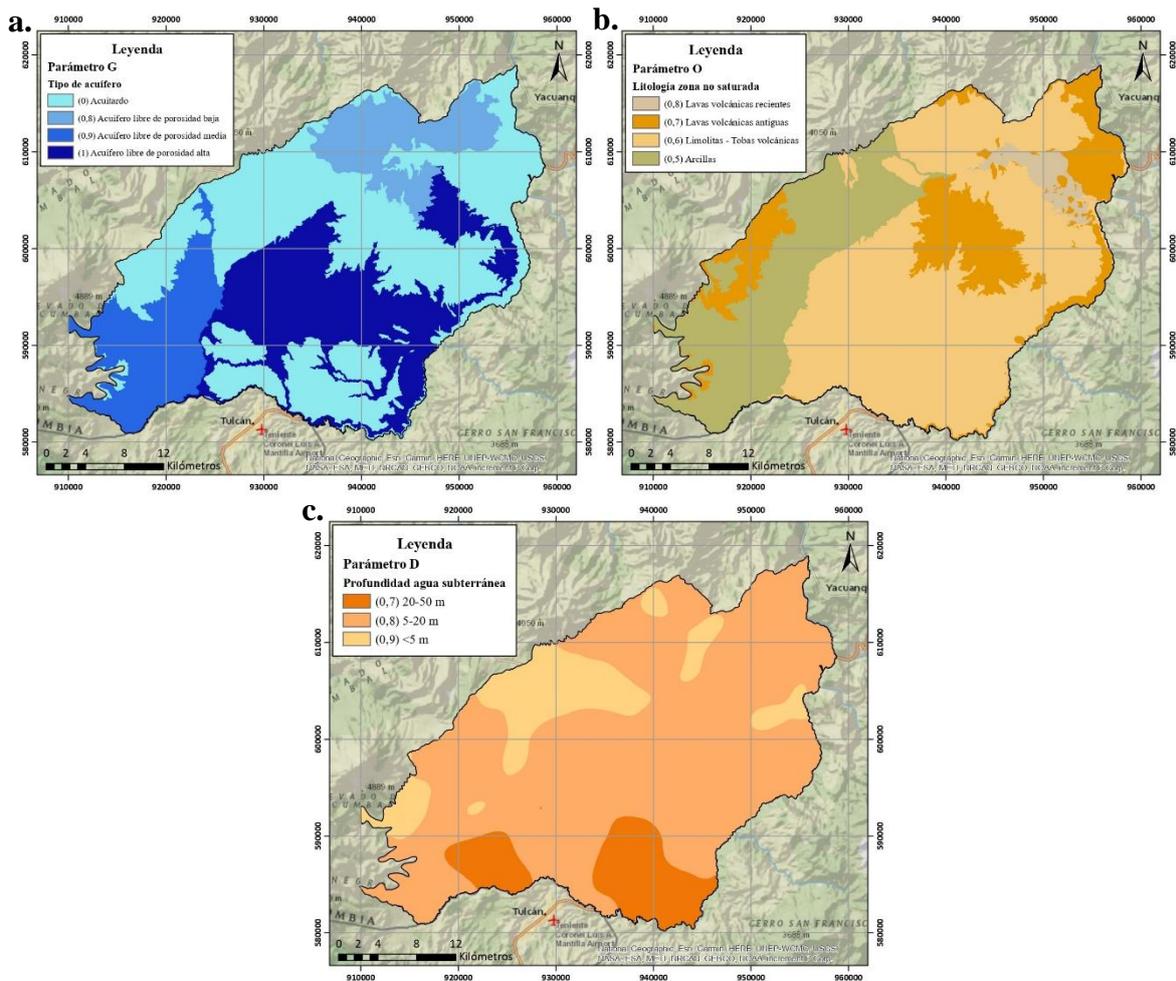


Figura 4. (a) Mapa de tipos de acuíferos en el SAAN, parámetro G. (b) Mapa de litologías en el SAAN, parámetro O. (c) Mapa de rangos de profundidades del agua subterránea en el SAAN, parámetro D. Elaboración propia con base en características hidrogeológicas y geológicas definidas por Pinilla et al. (2007) y niveles estáticos del inventario de puntos de agua obtenidos de la base de datos proporcionada por el SGC. DATUM: MAGNA Colombia Oeste.

6.2 Mapa vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

En el mapa final (Figura 5) se obtuvieron 3 categorías de vulnerabilidad intrínseca en el SAAN: muy baja, media y alta:

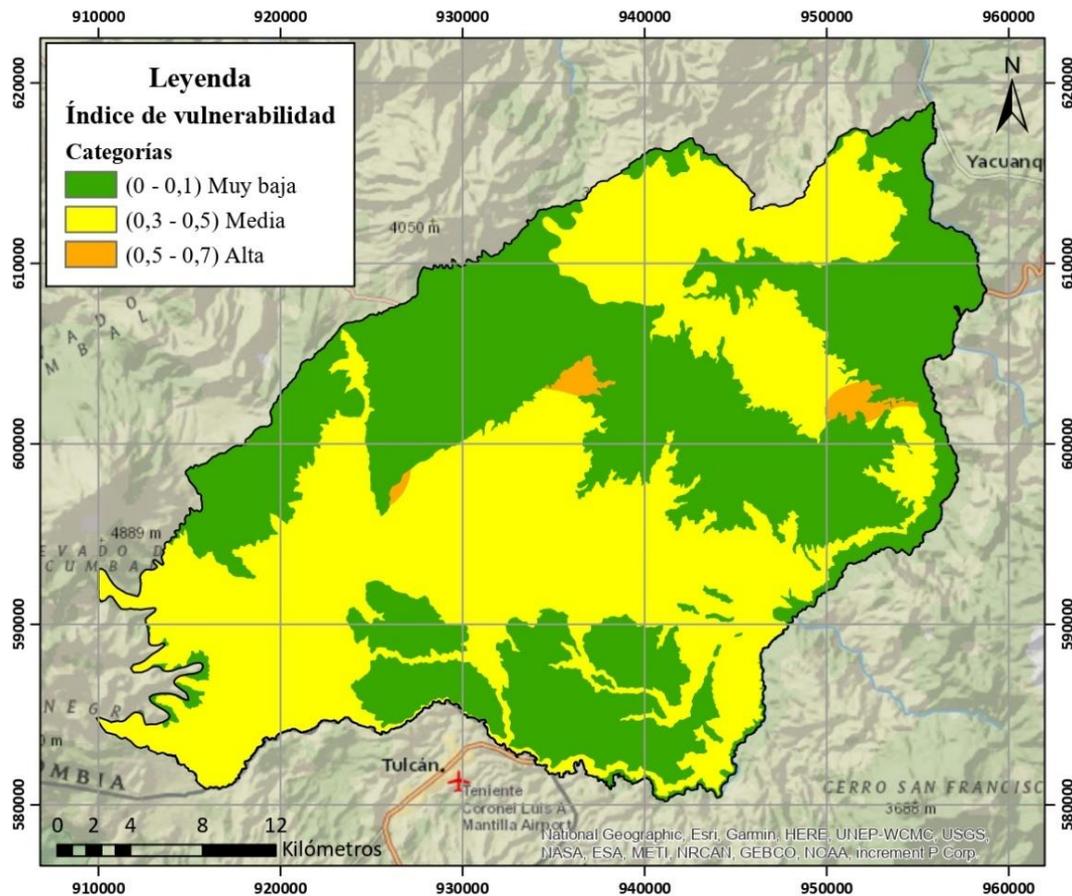


Figura 5. Mapa vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del SAAN. Elaborado a partir de la multiplicación de los mapas parámetros G, O y D. DATUM: MAGNA Colombia Oeste.

- Vulnerabilidad muy baja:** ocupa un área de 530.51 km², equivalente al 47.82%. Con base en la geología definida por Pinilla et al. (2007), se asocia que las unidades geológicas presentes en este tipo de vulnerabilidad son depósitos de flujo de escombros hiperconcentrado del Río Chiquito (Q2fechch), depósitos lacustres que se exponen en las cercanías de la Laguna Cumbal (Q2dl), depósitos piroclásticos de bloque y ceniza, depósitos de flujos y oleadas piroclásticas del Volcán Azufra (Q2spa1, Q2spa2, Q2spa3 Q2spa4), depósitos volcánicos de Rumichaca (Q1dr), depósitos de flujo de escombros de la Quebrada La Rastra (Q1dfer), depósitos inconsolidados de Pilcuán (Q2dip), lavas andesíticas de Cerro Crespo-Nasate (Q1lacn), lavas andesíticas del Cumbal antiguo (N2laca), lavas andesíticas de la Loma Combujes (N2lac), domos de Colimba (N2Q1dc), lavas andesíticas de Quitasol y Olaya (N2laqo), lavas Andesíticas de Pajablanca (N2lapb), lavas andesíticas del Río Guáitara (N2lagt), ignimbritas de Imues (N2Qii), ignimbritas y lavas andesíticas del Río Sapuyes (N2ilas), lavas andesíticas e ignimbritas de Potosí (N2laip), depósitos de terraza aluvial reciente (Dtar) y bloques de deslizamiento combinado (Bdc).

- **Vulnerabilidad media:** representa la mayor extensión en el SAAN, ocupando un área de 566.8 km² correspondiente al 51.09% del área total. En esta zona se encuentran las unidades de depósitos volcánicos de Las Lajas (Q1dl), depósitos piroclásticos del volcán Azufra (Q2spa1) y depósitos de los volcanes Cumbal y Chiles (Q1dcch).
- **Vulnerabilidad alta:** ocupa zonas puntuales de los depósitos volcánicos de Las Lajas (Q1dl) que abarcan un área total de 11.03 km², equivalentes solamente al 1%. En esta área se ubican cuatro aljibes que varían de 0.8 hasta 1.9 m de profundidad, indicando niveles muy someros y localizados en terrenos más planos en comparación con la topografía que los rodea.

7. Discusión.

Aproximadamente más del 55% de la morfología del AN corresponde a colinas suavizadas y relieves ondulados de hasta 200 m de altura, para el cual se esperaba una vulnerabilidad alta para la mayoría de cobertura del área, sin embargo, el mapa realizado con el método GOD permitió identificar que el SAAN se expone principalmente a una vulnerabilidad media, correspondiente al 51.09% del área total. Si bien es cierto que una morfología predominantemente plana favorece la infiltración de fluidos, la hipótesis de este proyecto se planteó haciendo un símil con la recarga hídrica de la zona, la cual está condicionada principalmente por la topografía, más no consideramos la influencia de las propiedades hidráulicas y granulométricas propias de cada tipo de roca en el ingreso de cargas contaminantes al sistema acuífero.

Los acuíferos clasificados en este proyecto como acuíferos libres con distintas porosidades, permeabilidades y niveles estáticos que varían entre 0.3 y 49.2 m, se exponen a la vulnerabilidad media y están suprayacidos por las unidades geológicas Q1dl, Q1dcch y Q2spa1. El estudio micromorfológico realizado por Salazar y Zapata (2007) define que la configuración general para la unidad Q1dl se caracteriza por caídas de ceniza fina, flujos y oleadas piroclásticas con granulometría de ceniza fina (< 2 mm) a lapilli (2-64 mm), donde los acuíferos libres se constituyen en las oleadas, las cuales presentan una porosidad de hasta 25%; esta unidad también contiene poros primarios con longitudes mayores a 400-500 μm generados entre fragmentos líticos y cristalinos, con diámetros de hasta 20 μm y microporosidad resultante de una ligera alteración de fragmentos de pómez en la textura. La porosidad de la unidad Q1dcch se asocia a procesos post-deposicionales y de fracturamiento mecánico que producen fracturas principales interconectadas que alcanzan porosidades de hasta 15% (Salazar y Zapata, 2007).

La unidad Q2spa1, localizada en la zona norte del AN, se compone de intercalaciones de depósitos de flujo piroclástico con partículas de tamaño de grano ceniza fina, fragmentos de pómez y depósitos de caída, que en general se encuentran saturados de agua (Pinilla et al., 2007). Surgió un interés particular el hecho de que estas tres unidades geológicas se encuentren en la clasificación de vulnerabilidad media, pues inicialmente se pensaba que, por la asociación de cada una a zonas con diferente potencial hidrogeológico, se obtendrían también diferentes rangos de vulnerabilidad; sin embargo, se propone que influyen más las propiedades hidráulicas que las netamente litológicas e igualmente considerar que el tiempo de infiltración de contaminantes en cada unidad es distinto.

Aunque el método GOD es de relativamente rápida aplicación por su reducido número de variables permitiendo que el proceso sea más simple o manejable, esta simplificación puede provocar una pérdida de detalles al no considerar otras características que podrían complementar el resultado final, como el tipo de suelo o la topografía. No obstante, se escogió este método fundamentalmente por la información disponible del SAAN. Si se busca estimar la vulnerabilidad haciendo un uso integrado de más propiedades, se puede optar por otros métodos que incluyan más parámetros de evaluación, como en el caso de DRASTIC, propuesto por Aller et al. (1987). Este método incluye siete parámetros correspondientes a D (depth to water: profundidad del nivel del agua), R (net recharge: recarga neta), A (aquifer media: formación geológica que constituye el acuífero), S (soil media: tipo de suelo), T (topography: topografía), I (impact of vadose zone: litología de la zona no saturada) y C (hydraulic conductivity: conductividad hidráulica). Este es un método ampliamente difundido en hidrogeología tanto para la evaluación cualitativa como para la elaboración de mapas que se basa en la asignación de índices que varían entre 1 a 10 de acuerdo con las características y el comportamiento de las variables expresadas en su acrónimo (Auge, 2004).

Dado que las limitaciones no permitieron aplicar otro método para estimar la vulnerabilidad en el SAAN, se decidió comparar el mapa resultante con el mapa nacional de coberturas de la tierra a escala 1:100.000 elaborado por Castellanos et al. (2021), quienes utilizaron la metodología de interpretación Corine Land Cover adaptada para Colombia e identificaron y caracterizaron los suelos de acuerdo con las Clases Nacionales de Coberturas de la Tierra. Estos autores determinaron que el departamento de Nariño está en tercer lugar respecto a todo el territorio nacional en extensión de coberturas de áreas agrícolas (cultivos y pastos). De este modo, se dedujo que el AN cuenta con cinco clasificaciones de cobertura (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de suelos para el AN. Elaboración propia con datos obtenidos de Castellanos et al. (2021).

Tipo de cobertura	Clasificación	Porcentaje
Territorios artificializados	Áreas urbanas	1.91%
Territorios agrícolas	Cultivos y pastos	88.44%
Áreas húmedas	Zonas pantanosas	0.11%
Bosques y áreas seminaturales	Bosques, vegetación herbácea, áreas abiertas con o sin vegetación	9.18%
Superficies de agua	Ríos, lagunas, cuerpos de agua artificiales, entre otros	0.29%

Al comparar las características de suelos junto con el mapa de vulnerabilidad final (Figura 6), concluimos que el índice de vulnerabilidad (iV) muy baja contiene territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques/áreas seminaturales y superficies de agua. Para las unidades con iV media se evidenciaron territorios artificializados, poca cobertura de bosques/áreas seminaturales y áreas húmedas y predominan los territorios agrícolas. El iV alta cuenta con territorios artificializados y de igual manera predominan los territorios agrícolas.

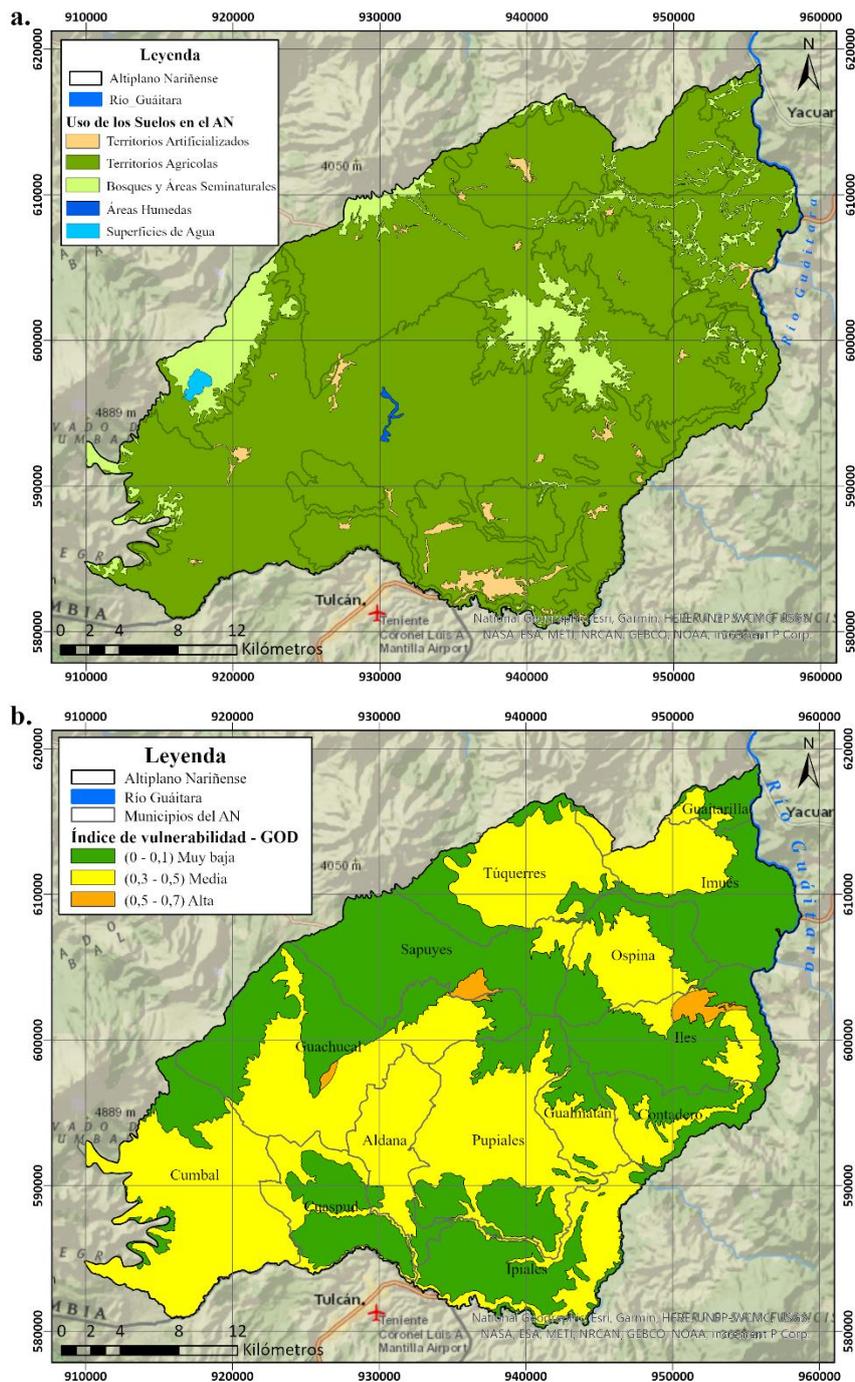


Figura 6. (a) Mapa usos del suelo en el AN junto a **(b)** mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del SAAN. Elaboración propia con base en el mapa de coberturas de la tierra de Castellanos et al. (2021). DATUM: MAGNA Colombia Oeste.

Dado que la mayoría de los suelos en el AN son de la clasificación de territorios agrícolas (88.44% del área total), se realizó una comparación del área de este suelo con respecto al área de los valores obtenidos en el resultado de GOD (Tabla 2). Esto evidenció que los índices con mayor porcentaje de suelos agrícolas corresponden a los territorios con vulnerabilidad media y

se consideran el iV de mayor impacto relacionado a problemáticas de posible contaminación por uso extensivo de agricultura.

Tabla 2. Porcentajes de áreas de uso agrícola con respecto a las zonas de potencial de vulnerabilidad estimadas con el método GOD. Elaboración propia.

Relación de iV y cobertura de suelo	Área (km²)	Porcentaje
iV muy baja en territorio agrícola	426.60	43.4%
iV media en territorio agrícola	545.03	55.5%
iV alta en territorio agrícola	10.67	1.1%
Territorio agrícola total	981.12	100%

De manera complementaria, la información sobre los usos del recurso hídrico subterráneo descrita por CORPONARIÑO (2017a) establece que en la cuenca del Río Guátara se han otorgado 142.71 l/s (51.26%) de caudal concesionado para uso agropecuario, continuando en orden de uso para consumo humano con un caudal de 121.24 l/s (43.54%) y finalmente, el uso de agua en lavaderos de carros y producción de leche, con un caudal concesionado de 14.49 l/s (5.20%). Si bien estos datos se analizaron para la cuenca del Río Guátara, permiten conocer de manera general las actividades a las que se les destina un mayor uso del agua subterránea en el área donde está el Sistema Acuífero del Altiplano Nariñense (SAAN).

El sector primario económico en el Altiplano Nariñense (AN) se caracteriza por el desarrollo agrícola, el cual se enfoca esencialmente en el cultivo de papa, siendo Túquerres, Ipiales, Pupiales, Guachucal, Gualmatán, Cumbal y Aldana de los principales productores (Miranda, 2010), es decir, 7 de los 14 municipios que abarcan la zona de estudio. El cultivo de papa es uno de los que exige mayor demanda de insecticidas y fungicidas, además es el segundo después del café en uso de fertilizantes (Miranda, 2020). Aunque se desconocen los tipos de agroquímicos y fertilizantes utilizados en los territorios agrícolas del AN, de manera general el uso excesivo de estos puede llevar a la salinidad del suelo, a la acumulación de metales pesados y al exceso de nutrientes inorgánicos como nitrógeno y fósforo (eutrofización del agua), los cuales pueden infiltrarse en el subsuelo y ser una fuente de contaminación hídrica y ambiental (Rodríguez-Eugenio et al., 2019). Además, CORPONARIÑO (2017c) menciona que la actividad agrícola tiene tendencias de crecimiento en su desarrollo y en extensión de terrenos.

Dadas las estimaciones de cargas contaminantes realizadas por CORPONARIÑO (2017b) en la cuenca del Río Guátara de materia orgánica (MO) y sólidos suspendidos, se evidenció que la mayor contaminación por vertimientos resalta en la parte alta de la cuenca, que es donde se localiza el SAAN. El Río Chiquito pertenece a la cuenca del Río Blanco y aporta cantidades de

cargas orgánicas tales como: 544.58 kg/día de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), explicada por Ángel (1994) como la cantidad de oxígeno disuelto en el agua que los microorganismos deben tener para descomponer la MO y se utiliza para medir el grado de contaminación; seguido de una carga de 484.70 kg/día de sustancias sólidas en suspensión total (SST) causada por materiales como sedimentos y MO en descomposición. El Río Sapuyes cuenta con las cargas contaminantes más altas de toda la cuenca principal, correspondientes a 1393.35 kg/día de DBO y 438.21 kg/día de SST. Adicionalmente, el IDEAM (2023) calculó el índice de alteración potencial de la calidad de agua (IACAL) en condiciones hidrológicas medias y secas, basado en afectaciones por intervenciones antrópicas, clasificando el Río Guáitara en una categoría alta en condiciones hidrológicas medias para el 2022.

Se consideraron dos situaciones que se presentan en los subsistemas hidrogeológicos oriental y occidental (Figura 4): primero, la descarga ocurre hacia ríos y quebradas, dentro de los cuales están los ríos Las Juntas, Sapuyes y Guáitara (Figura 7b), que a su vez están afectados por cargas contaminantes como las que se mencionaron previamente; segundo, en el subsistema oriental ocurre un intercambio en la infiltración, es decir, así como los drenajes superficiales reciben aportes del subsistema, estos también puede infiltrar agua (Bermoudes, 2009). Entonces, al existir tal intercambio en el subsistema oriental, proponemos de manera cualitativa que es probable que los acuíferos en esta zona estén siendo afectados por contaminantes suspendidos en los drenajes superficiales que se infiltran. Posteriormente, la posible contaminación relacionada con actividades agrícolas que inciden en la zona de vulnerabilidad media puede ingresar al río si se toman en cuenta las direcciones de flujo observadas en la figura 7.

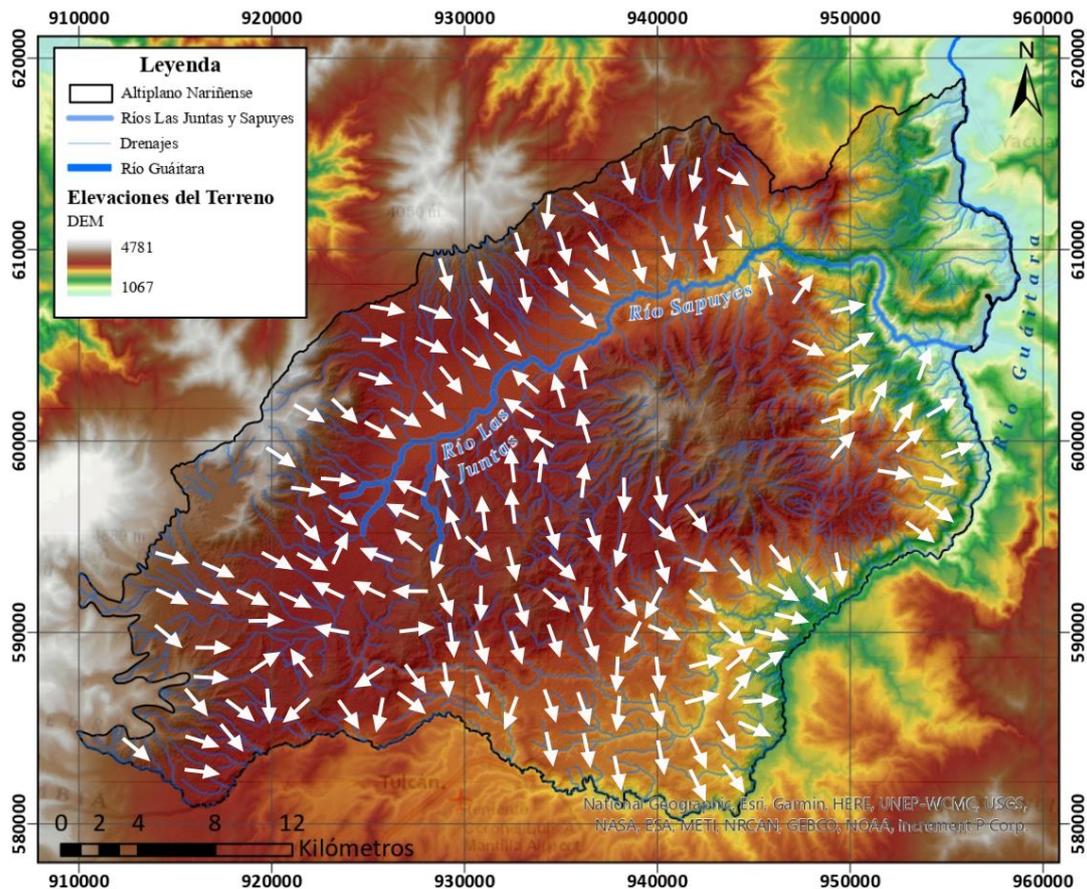


Figura 7. Direcciones de flujo del agua subterránea y drenajes principales en el AN. Elaboración propia con base en las direcciones de flujo propuestas por Bermoudes (2009). DATUM: MAGNA Colombia Oeste.

Teniendo en cuenta que las actividades agrícolas controlan los posibles contaminantes del área, se debe priorizar el control de los cultivos en las zonas evidenciadas con vulnerabilidad media, dado que el impacto sería de mayor gravedad; por ende, se podría optar por utilizar las zonas donde es menos susceptible a la contaminación como es el caso de las zonas de iV muy baja para destinar estas actividades de forma sistematizada, puesto que la agricultura es uno de los principales actores tanto económicos como de sostenimiento para la población el departamento de Nariño y especialmente el AN.

Cabe recordar que en este proyecto se utilizaron datos de 2005-2006, por lo tanto los iV obtenidos se estimaron para un sistema acuífero bajo las condiciones ambientales y antropogénicas de esas fechas, sin embargo, los tipos de acuíferos y las litologías son parámetros que tienden a ser estables a lo largo del tiempo, mientras que las profundidades del agua pueden cambiar debido a la variabilidad de factores como precipitación, recarga, extracción del agua, cambios en los usos del suelo o cambios en las condiciones climáticas. De este modo, se recomienda actualizar la información sobre pozos y aljibes para verificar tanto

sus profundidades como su uso y estado actual, que permitan mapear la vulnerabilidad bajo nuevas condiciones y la aplicación de métodos como DRASTIC. Finalmente, dado que la gestión integral de los recursos hídricos es necesaria para preservar la calidad del agua subterránea, se sugiere la implementación tanto de monitoreos constantes de puntos de captación, como regulación de la extracción de agua, la identificación de áreas y municipios en riesgo, y control bajo mediciones de los diferentes contaminantes, gestionados por autoridades ambientales.

Conclusiones

1. El Sistema Acuífero del Altiplano Nariñense (SAAN) se expone principalmente a una vulnerabilidad media, correspondiente al 51.09% del área total y se asocia a que los acuíferos libres, aunque con distintas porosidades y permeabilidades, permiten la infiltración de fluidos. De igual manera deben considerarse las zonas de vulnerabilidad muy baja y alta para la gestión del agua en la zona, pues representan el 48.91% de cobertura. Este resultado puede aportar información para promover la gestión sostenible del sistema hídrico subterráneo y la importancia de preservar la calidad del agua.
2. La recarga y descarga del SAAN generan una dinámica en la que en ambas partes posiblemente pueden recibir y aportar contaminantes que se han infiltrado desde el suelo o desde los drenajes superficiales. En este sentido, es necesario reconocer que los contaminantes derivados de la actividad agrícola, el manejo de desechos, vertimientos sanitarios, entre otros, deben restringirse y regularse mediante planes y estrategias, propuestas por entidades ambientales regionales y locales, más aún si el mayor uso del suelo es destinado para agricultura, con el objetivo de garantizar un suministro de agua subterránea seguro y sostenible para el abastecimiento humano.
3. El inventario de puntos de agua subterránea indica que existen aljibes y pozos con incremento de nitratos, cloruros y fosfatos probablemente asociados al uso de agroquímicos y fertilizantes que se infiltran en el suelo. Dado que los datos fueron tomados para un periodo de 2005-2006, se considera que hasta la actualidad las condiciones climáticas, los usos del suelo y usos del agua han cambiado. Por ello, se recomienda realizar nuevas campañas de muestreo de puntos de captación de agua subterránea en el Altiplano Nariñense (AN), enfocadas en la toma de datos hidroquímicos e hidrodinámicos del agua subterránea, con el principal fin de identificar zonas vulnerables a la contaminación derivada de actividades antropogénicas mediante la aplicación de nuevos métodos más completos de estimación de la vulnerabilidad.

Referencias

- Albinet, M., & Margat, J. (1975). *Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine*, Groundwater Pollution - Symposium - Pollution des Eaux Souterraines 103, 58-70. <https://acortar.link/EIyHED>
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., & Hachet, G. (1987). *DRASTIC: a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings (EPA 600/2-87)*. US Environmental Protection Agency Report. Environmental Research Laboratory. Office of Research and Development, Tucson. 1-455. <https://books.google.com.co/books?id=cbMiemwvjAAC&hl=es>
- Alvarado, L. F. (2017). *Problemática ambiental en el sector agropecuario de Nariño*. Federación Colombiana de Productores de Papa (FEDEPAPA). 42-45. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/37750>
- Ángel S, M. M. D. (1994). *Contribución al estudio de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)* [Tesis doctoral, Universidad autónoma de nuevo León]. Colección digital UANL. <https://cd.dgb.uanl.mx/handle/201504211/2933>
- Auge, M. (2007). *Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos*. Servicio Geológico Minero Argentino - SEGEMAR. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Buenos Aires, Argentina, 7, 1-35.
- Auge, M., (2004). *Vulnerabilidad de acuíferos*. Revista Latino-Americana de Hidrogeología. Universidad de Buenos Aires - Departamento de Ciencias Geológicas, 4, 85-103.
- Bermoudes, O. (2009). *Evaluación hidrogeológica regional del Altiplano Nariñense*. Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS.
- Betancur, T., Palacio, C., Gaviria, J. I., & Rueda, M. (2013). *Methodological proposal to assess groundwater contamination danger: Study case of Bajo Cauca aquifer (Colombia)*. Environmental Earth Sciences, 70(1), 315-328. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2129-6>
- Blanchard, A. F., Théophile, L., Marc, Y. T., François, Y. K. A., Suzane, K. O., Raphaël, O. K. A., Derving, B., & Zephir, D. L. O. (2016). *Cartographie de la vulnérabilité à la*

- pollution des aquifères du Socle Précambrien: cas de la région D'oumé (centre-ouest de la Côte D'ivoire)*. European Scientific Journal, 12(20), 374-394. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n20p374>
- Bolaños, C. M., & Manchabajoy, J. J. (2012). *Caracterización geográfica de las lagunas de la cuenca hidrográfica del Río Guáitara, departamento de Nariño* [Trabajo de Grado, Universidad de Nariño]. Departamento de Geografía. <https://sired.udenar.edu.co/2945/>
- Carvajal, D.A., & Romero, D.C. (2007). *Cartografía de las zonas de alteración hidrotermal del volcán Azufral, Nariño. Tomo V*. Proyecto de Investigación Geológica, Sísmica y Geotérmica en el Altiplano Nariñense. Acuerdo específico 046/2005. INGEOMINAS. <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=altiplano%20nari%C3%B1ense>
- Castellanos, H. O., Gómez, W. F., & Mayorga, N. C. (2021). *Mapa nacional de coberturas de la tierra, escala 1:100.000, periodo 2018*. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia. Memoria Técnica y resultados.
- Civita, M. & Chiappone, A. (1990). *Preparazione della carta di vulnerabilità per la rilocalizzazione di un impianto pozzi dell Aquedotto di Torino*. Convegno Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettività., 2(2), 461-462.
- CORPONARIÑO. (2017a). *Elaboración del plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Guáitara*. Resumen ejecutivo, fase diagnóstico POMCA Río Guáitara. Caracterización Funcional. 1-70. <https://corponarino.gov.co/tramites-y-servicios/tramites-ambientales/recurso-agua/>
- CORPONARIÑO. (2017b). *Elaboración del plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Guáitara*. Fase de diagnóstico, caracterización funcional. POMCA Río Guáitara. Caracterización Funcional. 1-70. <https://corponarino.gov.co/wp-content/uploads/2018/08/6-Caracterizaci%C3%B3n-funcional-de-la-Cuenca.pdf>
- CORPONARIÑO. (2017c). *Elaboración del plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Guáitara*. Fase de prospectiva y zonificación ambiental. POMCA Río Guáitara. Caracterización Funcional. 1-224. https://corponarino.gov.co/wp-content/uploads/2018/08/1.-Fase-de-Prospetiva-y-zonificaci%C3%B3n-ambiental_compressed-1.pdf

- Díaz, J. E., Rivera, C. L., & Figueroa, J. A. (2013). Estudio de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca. *Revista Ingeniería y Región*, 15-22. <https://journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/view/753/1445>
- Doerfliger, N., & Zwahlen F. (1997). *EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment*. Gunay & Jonshon (Eds). Int. Symp. on Karst Waters and Environ. Impacts. Antalya, Turkey. Balkema, Rotterdam. 117-123.
- Foster, S. (1987). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy*. En: W. Van Duijvenbooden and H.G. van Waegeningh, eds. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. TNO, The Hague, pp. 69-86.
- Foster, S., Hirata, R., & Andreo, B. (2013). *The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection?* *Hydrogeology Journal*, 21, 1389-1392. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7>
- Franco, J.V. (2007). Prospección geoelectrica en el Altiplano Nariñense. Área recursos del subsuelo. INGEOMINAS
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Protección de la calidad del agua subterránea*. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Groundwater Management Advisory Team. WHO-PAHO-CEPIS y UNESCO-ROSTLAC-PHI. Banco Mundial Washington DC. p 127
- Gómez, S., Gutiérrez, F. J., & Torres, C. M. (2011). *Vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación de las aguas subterráneas en la región de Bucaramanga*. *Revista UIS Ingenierías*, 10(1), 52-64. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/53-64>
- González, H., Zapata, G., & Montoya, D.M. (2002). *Geología y geomorfología de la plancha 428 Túquerres, Departamento de Nariño*. Informe técnico, Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS.
- Goyal, D., Haritash, A.K., & Singh S.K. (2021). A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods, 296, *Journal of Environmental Management*, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113161>

- Howard, K. & Gerber, R. (2018). *Impacts of urban areas and urban growth on groundwater in the Great Lakes Basin of North America*. Journal of Great Lakes Research, 44(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.11.012>
- IDEAM (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 1-496.
- IDEAM (2023). Estudio Nacional del Agua 2022. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 1-464.
- Miranda, R. C. (2010). Caracterización de la producción de papa en el departamento de Nariño mediante el análisis de datos multivariados [Tesis de maestría, Universidad del Norte]. Repositorio institucional Universidad del Norte. <http://hdl.handle.net/10584/9007>
- Montes, L.A., Restrepo, J.G. 2006. *Investigación sísmica en el Altiplano Nariñense. Tomo IV*. Proyecto de Investigación Geológica, Sísmica y Geotérmica en el Altiplano Nariñense. Convenio interinstitucional 046/2005. INGEOMINAS. <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=altiplano%20nari%C3%B1ense>
- Otálvaro, J. J. (2020). Evaluación del estado actual de la gestión integral del recurso hídrico subterráneo en Colombia [Tesis de maestría, Universidad Antonio Nariño].
- Pacheco, S. M., Morales, C.J., Veloza, J., & Villate, J. (2010). *Memoria técnica plancha 5-18, mapa de permeabilidades de Colombia en escala 1:500.000*. Proyecto SUB 09-21 Exploración de Aguas Subterráneas. Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B10/22005050018087/documento/pdf/2105180871101000.pdf>
- Pachón, M.A. (2006). *Análisis de patrones de fracturamiento en el Altiplano Nariñense. Tomo II*. Proyecto de Investigación Geológica, Sísmica y Geotérmica en el Altiplano Nariñense. Acuerdo específico 046/2005. INGEOMINAS. <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=altiplano%20nari%C3%B1ense>
- Pinilla, A., Ríos, P.A., Rodríguez, B.P., Roa, H.J., & Ladino, F.A. (2007). *Memoria explicativa de la cartografía geológica y geomorfológica del Altiplano Nariñense. Tomo I*. Proyecto de Investigación Geológica, Sísmica y Geotérmica en el Altiplano Nariñense. Acuerdo

específico

046/2005.

INGEOMINAS.

<https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=altilano%20nari%C3%B1ense>

Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M & Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura - FAO. 1-132. <https://www.fao.org/3/i9183es/i9183es.pdf>

Ruiz, D. A. (2018). *Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos someros con porosidad primaria, departamento del Quindío-Colombia*. [Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Jorge Tadeo Lozano]. Repositorio institucional Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/4463>.

Salazar, E.A., Zapata, V.L. (2007). *Estudio estratigráfico, mineralógico, granulométrico y micromorfológico del Altiplano Nariñense. Tomo III*. Proyecto de Investigación Geológica, Sísmica y Geotérmica en el Altiplano Nariñense. Acuerdo específico 046/2005. INGEOMINAS.
<https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=altilano%20nari%C3%B1ense>

Velandia, F., Salazar, E., Pulgarín, B., Forero, H., & Hincapié, G. (2008). *Estratigrafía de los depósitos volcánicos del Altiplano Nariñense, Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 57-68

Vélez, M. V., Ortiz, C., & Vargas, M. C. (2011). *Las aguas subterráneas. Un enfoque práctico*. Libros del Servicio Geológico Colombiano.
<https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/76>

Anexos

Anexo 1. Determinación de los tipos de acuífero para asignación del parámetro O. Elaboración propia con base en la descripción unidades con potencial hidrogeológico y unidades geológicas asociadas propuestas por Pinilla et al., (2007).

Unidad	Definición	Características	Unidades geológicas	Propiedades hidráulicas	Tipo de acuífero	G
Uaph	Unidad con alto potencial hidrogeológico	Intercalación de depósitos inconsolidados de flujos piroclásticos, caída, oleadas y paleosuelos. Posee la mayor distribución areal. Presencia de aljibes	Q1dl: Depósitos volcánicos de Las Lajas	Presentan buena porosidad primaria y secundaria y buena selección. A pesar de tener paleosuelos o depósitos arcillosos, estos tienen porosidad secundaria	Acuífero libre	1.0
Umph	Unidad con medio potencial hidrogeológico	Intercalación de depósitos inconsolidados de flujos piroclásticos y caída piroclástica, buena selección, amplia distribución areal. Presencia de aljibes	Q1dcch: Depósitos de los volcanes Cumbal y Chiles	Porosidad primaria de hasta 15%, aunque algunos depósitos de flujo de escombros presentan geometría lenticular que los hace comportarse como barreras hidrogeológicas	Acuífero Libre	0.9
Ubph	Unidad con bajo potencial hidrogeológico	Intercalación de depósitos inconsolidados de flujos piroclásticos y caída piroclástica, de amplia distribución areal, presencia de aljibes con poco espesor	Q2dar: Depósitos aluviales recientes Q2dl: Depósitos lacustres Q2spa1: Depósitos piroclásticos del Volcán Azufral	Baja a media porosidad primaria. Los aljibes están en contacto con barreras hidrogeológicas	Acuífero Libre	0.8
Usph	Unidad sin potencial hidrogeológico	Unidades ubicadas en en altos topográficos y no permiten acumulación de agua. Tienen poca extensión areal	Q2dfch: Depósitos de flujo de escombros hiperconcentrados de Río Chiquito Q1lacn: Lavas andesíticas de Cerro Crespo - Nasate Q1dfcb: Depósitos de flujo de escombros del Río Boquerón Q1dfer: Depósitos de escombros de la Quebrada La Rastra Q1ia: Ignimbritas del Volcán Azufral Q1dr: Depósitos volcánicos de Rumichaca Q1dfch: Depósitos de flujos de escombros de La Chorrera Q2dcpa: Depósitos de caída piroclástica de Alpán Q2spa2: Depósitos de flujos y oleadas piroclásticas del Volcán Azufral Q2spa3: Depósitos de flujos y oleadas piroclásticas del Volcán Azufral Q2spa4: Depósitos de flujos piroclásticos de bloque y ceniza del Volcán Azufral Q2dp: Depósitos de detritos y pendiente Q2dip: Depósitos inconsolidados de Pilcuán N2Q1dc: Domos de Colimba N2Qlacc: Lavas andesíticas cordadas del Volcan Cumbal N2Qii: Ignimbritas de Imués N2ilas: Ignimbritas y lavas andesíticas del Río Sapuyes N2laip: Lavas andesíticas e ignimbritas de Potosí N2lapb: Lavas andesíticas de Pajablanca N2laca: Lavas andesíticas de Cumbal Antiguo N2lac: Lavas andesíticas de la Loma Combujes N2laqo: Lavas andesíticas de Quitasol y Olaya N2lagt: Lavas andesíticas del Río Guátara	Presentan porosidad primaria y secundaria pero no es significativa. Aunque las unidades retienen agua, su espesor de saturación es muy limitado	Acuitardo	0.0

Anexo 2. Descripción unidades geológicas del AN y determinación del parámetro O. Elaboración propia con información tomada de Pinilla et al., (2007).

Unidad geológica	Símbolo	Edad	Descripción	O
Depósitos de terraza aluvial reciente	Dtar	Holoceno	Depósitos inconsolidados de barras aluviales en los cauces actuales. Constan de bloques y gravas de rocas volcánicas en una matriz de arena gruesa o gravas medias a finas. La mayor extensión se presenta en los cauces del Río Guaitara	0.8
Bloques de deslizamiento combinado	Bdc	Holoceno	Depósitos de caída de roca producidos por procesos de remoción en masa vertical y/o lateral. Actualmente se encuentran inactivos	0.7
Depósitos inconsolidados de Pilcuán	Q2dip	Holoceno	Depósitos de flujo de escombros matriz soportados con puntual desarrollo de barras de gravas, adosados a las unidades aflorantes en el cañón del Río Guaitara. Su origen se interpreta como un represamiento antiguo del cauce	0.6
Depósitos lacustres	Q2dl	Holoceno	Depósitos de origen lagunar. Afloran en los alrededores de la Laguna Cumbal	0.5
Depósito de flujo de escombros hiperconcentrado del Río Chiquito	Q2dfch	Holoceno	Flujos de escombros hiperconcentrados, clasto soportados, bajo contenido de arcilla dentro de la matriz, fábrica aleatoria y buena selección. La matriz presenta un tamaño de grano ceniza media a gruesa, la cual es escasa	0.5
Depósitos aluviales recientes	Q2dar	Holoceno	Depósitos puntuales de gravas, arenas, limos y lodos originados por la actividad reciente de las corrientes fluviales	0.7
Depósitos de flujos piroclásticos de bloque y ceniza del Volcán Azufral	Q2spa4	Pleistoceno	Depósitos de flujos piroclásticos de bloque y ceniza del volcán Azufral. Unidad El Carrizo	0.6
Depósitos de flujos y oleadas piroclásticas del Volcán Azufral	Q2spa3	Pleistoceno	Depósitos de flujos y oleadas piroclásticas del volcán Azufral. Unidades La Cortadera y El Espino	0.5
Depósitos de flujos y oleadas piroclásticas del Volcán Azufral	Q2spa2	Pleistoceno	Depósitos de flujos y oleadas piroclásticas del Volcán Azufral. Unidades La Calera, La Cortadera y El Espino	0.5
Depósitos piroclásticos del Volcán Azufral	Q2spa1	Pleistoceno	Depósitos piroclásticos del Volcán Azufral. Unidad Túquerres	0.6
Depósitos volcánicos de Rumichaca	Q1dr	Pleistoceno	Sucesión de depósitos de caída piroclástica, color blanco, ricos en pómez y vidrio volcánico cuyo espesor promedio es 2 - 3 mts. los cuales contienen un depósito de caída piroclástica café de ceniza fina y puntualmente de flujo piroclástico	0.6
Depósitos volcánicos de Las Lajas	Q1dl	Pleistoceno	Depósitos piroclásticos formados por la intercalación de depósitos volcánicos primarios (flujos piroclásticos, depósitos de oleadas piroclásticas y depósitos de caída piroclástica) y volcánicos puntuales retrabajados por acción fluvial	0.6
Depósitos de los volcanes Cumbal y Chiles	Q1dcch	Pleistoceno	Depósitos volcánicos primarios y retrabajados, asociados a la actividad antigua y reciente del volcán Cumbal y Chiles, representados por flujos de escombros, flujos piroclásticos y depósitos de caída piroclástica con procesos intensos de edafización	0.5
Depósitos de flujo de escombros de la Chorrera	Q1dfch	Pleistoceno	Depósitos de flujo de escombros polimícticos que presentan diferentes unidades de deposición cuya matriz es ceniza media-gruesa, fragmentos pumíticos y líticos < 1 cm. Armazón de fragmentos de lavas andesíticas negras y rojizas	0.6
Depósitos de flujo de escombros de la Quebrada La Rastra	Q1dfer	Pleistoceno	Flujo de escombros polimíctico, matriz compuesta por ceniza media y cristales de cuarzo, biotita, plagioclasa y piroxenos, su armazón está compuesto por fragmentos líticos de lavas y fragmentos de flujo piroclástico compactado. Presenta vesículas de deshidratación	0.6
Depósitos de flujo de escombros del Río Boquerón	Q1dfb	Pleistoceno	Depósitos de flujo de escombros cuya matriz está compuesta por ceniza fina y un armazón de lavas andesíticas grises oscuras. Presenta intercalaciones de oleadas y depósitos de caída piroclástica	0.6
Lavas andesíticas de Cerro Crespo-Nasate	Q1lacnn	Pleistoceno	Lavas andesíticas de color gris oscuro, textura porfirítica y fenocristales de plagioclasa, clinopiroxenos y minerales máficos sin diferenciar dentro de una matriz vítrea	0.7
Lavas andesíticas cordadas del Volcán Cumbal	N2Qlace	Plioceno	Colada de lava con textura cordada y composición andesítica aflorante en el edificio actual del Volcán Cumbal	0.7
Domos de Colimba	N2Q1dc	Plioceno	Lavas masivas no vesiculadas, textura porfirítica, fenocristales de plagioclasa, feldespatos potásico rosado, biotita y cuarzo dentro de una matriz microcristalina a hipocristalina de color gris claro. Presenta una coloración roja penetrativa asociada con oxidación térmica y alto grado de fracturamiento	0.7
Ignimbritas de Imues	N2Qii	Plioceno	Flujo piroclástico de gran volumen y grado variable de compactación, compuesto por ceniza gruesa y cristales de plagioclasa, cuarzo, biotita, hornblenda, fragmentos de pómez y líticos de lavas grises y rojas	0.7
Ignimbritas y lavas andesíticas del Río Sapuyes	N2ilas	Plioceno	Sucesión de lavas y depósitos de flujo piroclástico de gran volumen, espesor métrico a decamétrico, compactación media a alta, compuestos por una matriz de ceniza fina que contiene fragmentos líticos y cristales de biotita y plagioclasa	0.8
Lavas andesíticas e ignimbritas de Potosí	N2laip	Plioceno	Intercalación de flujos de lavas con textura vesiculada, brechas de techo y base e intercalaciones de flujos de lava, masivos, color gris oscuro, suprayacidos por ignimbritas de composición ácida y flujos de lava con diaclasamiento laminar	0.7
Lavas andesíticas de Pajablanca	N2lapb	Plioceno	Lavas andesíticas grises oscuras con textura porfirítica, vitrofídica con relación matriz:cristales 70%:30% en <1 mm, plagioclasa, hornblenda, cuarzo y piroxeno. Puntualmente presenta textura fluidal y xenolitos máficos	0.7
Lavas andesíticas del Cumbal Antiguo	N2laca	Plioceno	Flujos de lava de composición andesítica de color gris, textura vesiculada, alto grado de diaclasamiento laminar por enfriamiento y brechas de techo	0.7
Lavas andesíticas de Quitasol y Olaya	N2laqo	Plioceno	Lavas andesíticas de color gris con textura porfirítica vitrofídica compuestas por cristales de plagioclasa, hornblenda y cuarzo, en una matriz vítrea criptocristalina	0.7
Lavas andesíticas de la Loma Combujes	N2lac	Plioceno	Lavas andesíticas de color gris oscuro con textura porfirítica vitrofídica, relación matriz:cristales = 60%:40%. Los cristales son de plagioclasa, cuarzo, hornblenda y piroxeno. Presenta diaclasamiento por enfriamiento y meteorización	0.7
Lavas andesíticas del Río Guaitara	N2lagt	Mioceno	Lavas andesíticas grises con textura porfirítica, de matriz afanítica, que alteran a color verde, rojo o blanco, las cuales puntualmente presentan diaclasas por enfriamiento y tectonismo	0.7